

Wetterradar – Eine Gerätevorstellung

Dr. **Martin Hagen**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen

Kurzfassung:

Das Wetterradar ist ein unverzichtbares Werkzeug für die Analyse, Kurzzeitvorhersage und Erforschung von Niederschlagsereignissen wie Fronten oder Gewitter. Nur mit einem Wetterradar oder einem Verbund von mehreren Wetterradaren kann die räumliche Ausdehnung und die zeitliche Entwicklung von Niederschlagssystemen drei-dimensional mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erfasst werden und interne Vorgänge, wie zum Beispiel die Bildung von Hagel oder das Entstehen von Tornados untersucht werden. Moderne Wetterradersysteme stellen eine Anzahl verschiedener Zielgrößen zur Verfügung mit denen die Struktur sowie dynamische und mikrophysikalische Vorgänge von Niederschlagssystemen untersucht werden können.

1. Einleitung

Ein Wetterradar ist das einzige Messsystem, mit dem die drei-dimensionale Struktur von Niederschlagssystemen mit hoher räumlicher (100-1000 Meter) und zeitlicher (2-10 Minuten) Auflösung erfasst werden kann. Wetterradare werden für eine Vielzahl von Anwendungen betrieben: (i) Identifikation von Niederschlagsereignissen (z.B. Fronten und Gewitter) für die Beschreibung des aktuellen Wetters; (ii) Verfolgen und Extrapolation von Gewitterzugbahnen für die Kurzzeitvorhersage; (iii) detaillierte Untersuchung von dynamischen und mikrophysikalischen Vorgängen in Niederschlagssystemen für die Forschung; (iv) Bestimmung von Niederschlagsintensitäten für hydrologische Anwendungen, wie zum Beispiel Hochwasservorhersagen von Flusseinzugsgebieten oder auch die Steuerung von Kanalnetzen. Zu diesen Zwecken werden in Europa von den Wetterdiensten, bzw. den Flugsicherungen aktuell etwa 200 Wetterradare zum Teil seit mehr als 30 Jahren betrieben. Aktuelle Forschungsthemen sind die Anwendung von neuen Radartechnologien, die Entwicklung von meteorologischen und hydrologischen Auswerte- und Qualitätskontrollalgorithmen.

2. Prinzip eines Wetterraders

Im Folgenden werden einige Prinzipien der Wetterradmessung beschrieben, Details finden sich zum Beispiel bei [1]. Fortschrittliche Radarmethoden und Anwendungen sind bei [2] beschrieben.

Ein Radar sendet einen kurzen Puls elektromagnetischer Wellen mit hoher Leistung über eine gerichtete Antenne aus. Dieser Puls wird an Objekten zurückgestreut und von dem Radar wieder empfangen. Aus der Ausrichtung der Antenne und der Laufzeit des Pulses lassen sich die Lage und die Entfernung des Objekts bestimmen (Bild 1). Aus der Stärke des zurückgestreuten Signals lassen sich Aussagen über das Objekt gewinnen. Die prinzipiellen Komponenten eines Wetterradars sind der Radarsender, die Antenne, der Radarempfänger, die Signal- und Datenverarbeitung sowie die Produkt- bzw. Bildgenerierung. Die Steuerung des Radars, die Datenverarbeitung und Produktgenerierung erfolgt bei modernen Wetterradaren mit leistungsfähigen Industrierechnern. Auf der Empfangsseite werden die Signale bereits zu einem frühen Zeitpunkt digitalisiert, damit können die verschiedensten digitalen Filter zur Unterdrückung von Störschön auf die Daten angewandt werden.

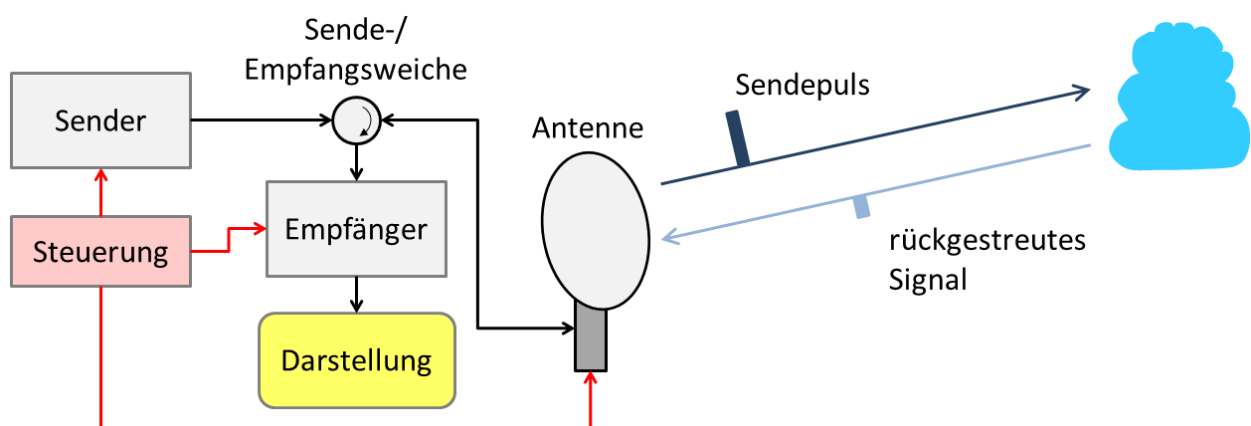


Bild 1: Funktionsprinzip (rechts) und prinzipieller Aufbau (links) eines Wetterradars.

Für Wetterradare werden elektromagnetische Wellen mit verschiedenen Wellenlängen verwendet. Die Wellenlänge wird gemäß den erwarteten Niederschlagsereignissen ausgewählt, aber auch logistische Aspekte wie die Antennengröße oder die Kosten des Systems spielen eine Rolle (beide nehmen mit zunehmender Wellenlänge zu). Da Wellen mit einer kurzen Wellenlänge beim Durchgang durch Niederschlag stärker gedämpft werden, werden Wetterradare mit größeren Wellenlängen in Regionen mit starkem Niederschlag bevorzugt. Die meisten Wetterradare in Europa arbeiten im C-Band (Frequenz 5,6 GHz, Wellenlänge 5,4 cm); im Mittelmeerraum werden auch S-Band Geräte (Frequenz 2,8 GHz, Wellenlänge 10,7 cm) betrieben. Günstigere X-Band Systeme (Frequenz 9,4 GHz, Wellenlänge 3,2 cm) werden für Anwendungen mit kurzer Reichweite wie Stadtentwässerung oder regionale Flusseinzugsgebiete verwendet. X-Band Systeme werden aber auch genutzt, um in gebirgigen Regionen Messungen in Tälern zu ermöglichen, wenn diese von den Radaren auf den Gipfeln oder außerhalb der Gebirge nicht erfasst werden. Typische technische Eigenschaften von C- und X-Band Wetterradarsystemen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Charakteristische Parameter eines C- und X-Band Wetterradars.

Parameter	C-Band Radar	X-Band Radar
Sendeleistung (Puls)	200 - 400 kW	10 - 100 kW
Frequenz / Wellenlänge	5600 - 5650 MHz / 5,4 - 5,3 cm	9300 - 9500 MHz / 3,2 - 3,1 cm
Puls Dauer	0,6 - 1,5 μ s	0,3 - 3,3 μ s
Tiefe des Messvolumen	90 - 225 m	50 - 500 m
Pulswiederholfrequenz	300 - 1200 Hz	300 - 2500 Hz
Maximale Entfernung	120 - 300 km	60 - 200 km
Durchmesser Antenne	4,2 m	0,7 - 2,4 m
Drehgeschwindigkeit Antenne	2 - 6 U/min.	2 - 6 U/min.
Strahlbreite	1°	1 - 3°
Polarisation	Konventionelles Radar: linear horizontal; dual-Polarisation Radar: Senden linear 45° Empfangen linear horizontal und vertikal	

Die Radarmessungen werden normalerweise mit einem Abtastverfahren auf konischen Ebenen gewonnen. Bei festem Höhenwinkel (Elevation) und variablem Azimutwinkel wird mit einem Antennenumlauf das Messgebiet abgetastet. Dieses Abtastverfahren und die damit verbundene graphische Darstellung der Messungen wird PPI genannt (*plan position indicator*). Zur Erfassung der drei-dimensionalen Struktur von Niederschlagssystemen wird eine Folge (10 bis 20) von PPI-Messungen bei unterschiedlichen Elevationswinkeln (zwischen 0.5 und 40°) zu einer Volumenmessung zusammengefasst (Bild 2). Diese Messungen dauern 5 bis 10 Minuten und erlauben die Erzeugung von verschiedenen Darstellungsarten wie pseudo 3D-Projektionen, Maximum-Projektionen (Bild 3), beliebige Querschnitte oder die Darstellung der maximalen vertikalen Erstreckung von Niederschlagssystemen.

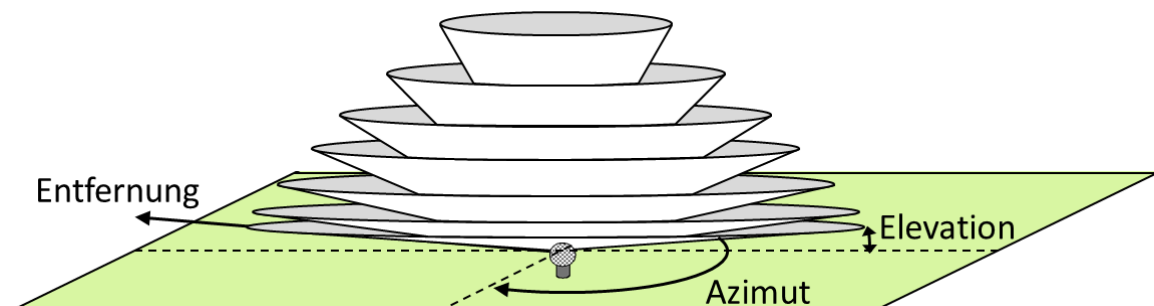


Bild 2: Schema einer Volumenmessung bestehend aus einer Anzahl konischer Messungen entlang des Azimutwinkels bei fester Elevation.

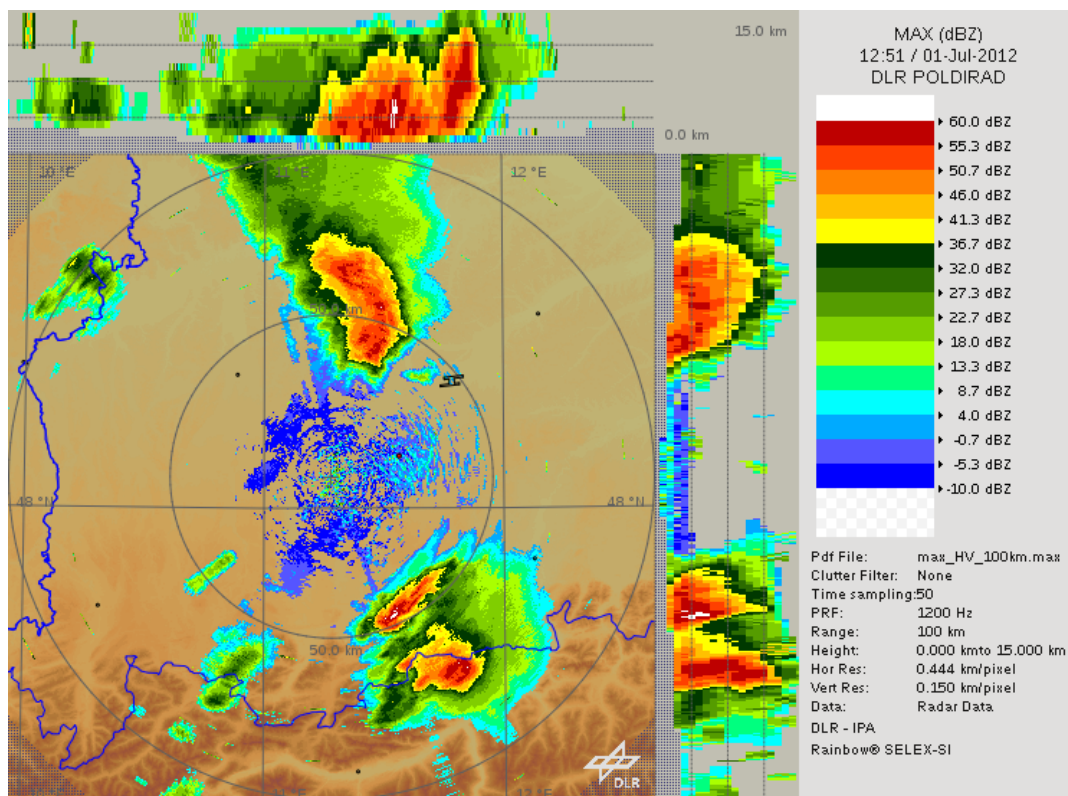


Bild 3: Maximum-Projektion des Reflektivitätsfaktors. Draufsicht 200 x 200 km², Seitenrisse 0 - 15 km Höhe. Messungen mit dem DLR Radars POLDIRAD am 1.7.2013 um 12:51 UTC.

3 Zielgrößen eines Wetterraders

Andere Radararten beschränken sich in der Regel auf das Erkennen von Zielen und gegebenenfalls die Bestimmung von deren Geschwindigkeit. Wetterrader haben darüber hinaus die Aufgabe das Ziel zu quantifizieren, also nicht nur ein Niederschlagsgebiet zu lokalisieren, sondern auch die Niederschlagsmenge zu bestimmen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Zielgrößen eines Wetterraders zusammengefasst, Details finden sich zum Beispiel bei [1] oder [3]. Je nach technischer Realisierung ergeben sich verschiedene Zielgrößen:

- Konventionelles Rückstreuradar
aus der empfangenen Leistung wird der Radarreflektivitätsfaktor berechnet.
- Dopplerradar
zusätzlich zum Radarreflektivitätsfaktor wird die radiale Geschwindigkeit des Ziels unter Ausnutzung des Dopplereffekts bestimmt.
- Dual-Polarisationsradar
mit der Verwendung von unterschiedlichen polarisierten Wellen für Senden und Empfangen lassen sich Zielgrößen bestimmen, die von der Form und dem Fallverhalten der streuenden Niederschlagsteilchen abhängig sind. Darüber hinaus stehen die Zielgrößen eines Dopplerradars zur Verfügung.

3.1 Radarreflektivität und Radarreflektivitätsfaktor

Die Radarreflektivität η oder kurz Reflektivität ist das Synonym für die Leistung des zurückgestreuten Radarpulses im Vergleich zur ausgesendeten Leistung und beschreibt die auf das Einheitsvolumen normierte Summe der Rückstreuquerschnitte σ aller Teilchen in dem Messvolumen. Für Teilchen groß gegenüber der Wellenlänge entspricht σ dem geometrischen Querschnitt. Für Teilchen viel kleiner als die Wellenlänge (d.h. bei einem Wetterradar in der Regel alle Arten von Hydrometeoren) gilt die Rayleigh Approximation der Streuung und σ ist proportional zu D^6 , wobei D den Teilchendurchmesser bezeichnet. σ hängt darüber hinaus noch von der Radarwellenlänge und dem Brechungsindex des streuenden Teilchens ab.

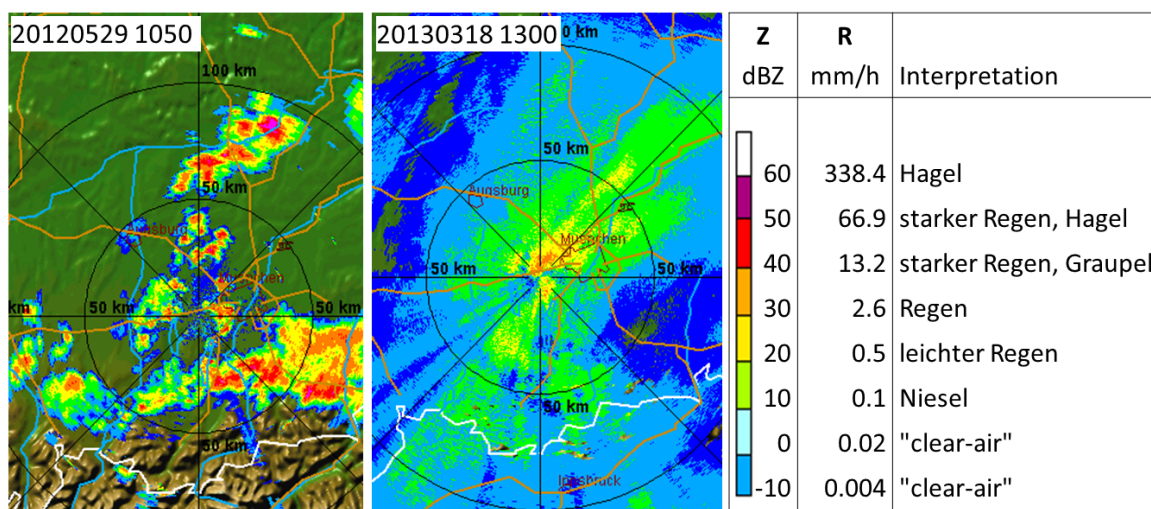


Bild 4: PPI-Darstellung des Reflektivitätsfaktors einer Schauer- und Gewitterlage (links) und eines gleichförmigen Schneefallereignisses (rechts). Messungen mit dem DLR Radar POLDIRAD.

Um eine Vergleichbarkeit der Radarreflektivität die bei verschiedenen Wellenlängen gemessen wurde herzustellen, wurde der Radarreflektivitätsfaktor z oder kurz Reflektivitätsfaktor¹ als die auf das Einheitsvolumen normierte Summe von D^6 aller Teilchen im Messvolumen eingeführt. Es wird hierbei immer der Brechungsindex von Wasser angenommen. Die Einheit von z ist $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$. Da der Wertebereich von z sehr groß werden kann, wird der Radarreflektivitätsfaktor im Allgemeinen als logarithmisches Verhältnis zu dem Radarreflektivitätsfaktor eines 1 mm Wassertropfens ausgedrückt $Z = 10 \log(z/\text{mm}^6 \text{m}^{-3})$. Die Einheit der logarithmischen Größe Z ist dBZ. Werte von Z in Regen liegen im Bereich 10 bis 55 dBZ, höhere Werte sind in der Regel ein Indiz für das Auftreten von Hagel im Messvolumen. Bei Schneefall werden im Allgemeinen niedrigere Werte als 20 dBZ beobachtet (Bild 4).

¹ Im allgemeinen Sprachgebrauch bezeichnet der Begriff Reflektivität in der Regel den Radarreflektivitätsfaktor z .

3.2 Radialgeschwindigkeit

Bei einem Dopplerradar ist es möglich den Phasenunterschied zwischen ausgesendeter und empfangener Welle zu bestimmen. Daraus lassen sich unter anderem die Dopplerfrequenz bestimmen, die dann auftritt, wenn zwischen Signalquelle (hier: rückstreuende Teilchen) und Empfänger eine relative Bewegung stattfindet. Unter der Annahme, dass sich z.B. Regentropfen mit dem Wind mitbewegen, lassen sich damit Luftbewegungen bestimmen. Dabei ist zu beachten, dass mit dem Radar nur radiale Bewegungen erfasst werden können, also Bewegungen auf das Radar zu und vom Radar weg. Bewegungen tangential zum Radarstrahl ergeben keine Dopplerverschiebung. Mit mathematischen Verfahren ist es jedoch möglich, das drei-dimensionale Windfeld abzuleiten (vgl. Kapitel 4.2; Bild 5).

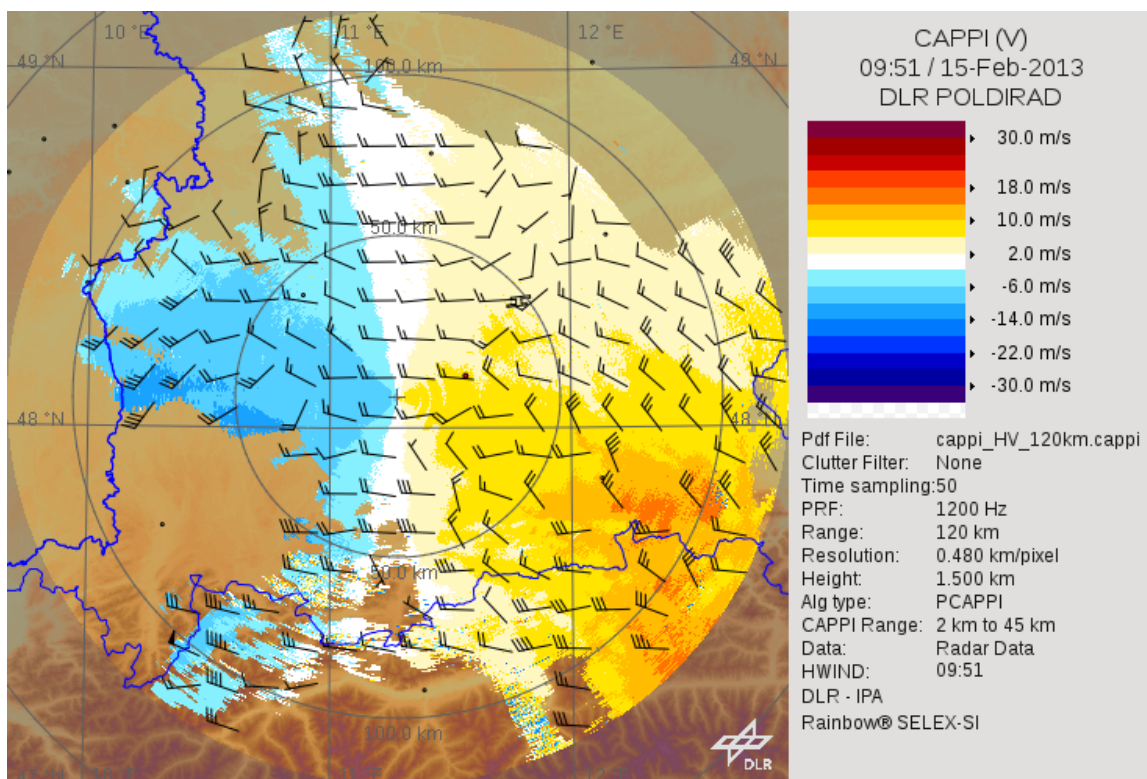


Bild 5: Darstellung der Radialgeschwindigkeit auf 2 km Höhe (über NN) und den mit einem single-Doppler Verfahren abgeleiteten Windvektoren (meteorologische Notation). Messungen mit dem DLR Radar POLDIRAD am 15.2.2013 um 9:51 UTC.

3.3 Zielgrößen eines dual-Polarisations Radars

Dual-Polarisations Radare für den operationellen Betrieb senden den Radarpuls gleichzeitig mit einer linear horizontal sowie vertikal polarisierten Komponente aus. Mit zwei Empfängerkreisen werden die horizontale und vertikale zurückgestreute Komponente getrennt empfangen und ausgewertet. Aus dem Vergleich der beiden Empfangssignale lassen sich die im Folgenden aufgeführten Zielgrößen bestimmen. Wetterradare, die in der Forschung eingesetzt werden haben durch eine aufwändigere Technik die Möglichkeit weitere unterschiedliche Zielgrößen zu messen. Eine detaillierte Darstellung der Methoden und Techniken findet sich zum Beispiel bei [3].

3.3.1 Differentielle Reflektivität

Das Verhältnis der Reflektivität gemessen bei horizontaler zu vertikaler Polarisation ist die differentielle Reflektivität Z_{DR} , sie wird als logarithmisches Maß angegeben: $Z_{DR} = 10 \log(z_H/z_V)$, wobei z_H und z_V der horizontale bzw. vertikale Reflektivitätsfaktor in mm^6m^{-3} ist. Z_{DR} beschreibt das Achsenverhältnis der streuenden Teilchen. Z_{DR} ist positiv im Bereich von 0 bis 5 dB für fallende Regentropfen, da diese aufgrund ihrer Umströmung abgeflacht sind (Bild 6 Mitte). Messungen in Hagel ergeben ein Z_{DR} um Null, da Hagel beim Fallen stark taumelt. Z_{DR} wird zur Bestimmung der Regenintensität und zur Unterscheidung von Hydrometeoren verwendet.

3.3.2 Ko-polare Kreuzkorrelation

Die ko-polare Kreuzkorrelation ρ_{HV} beschreibt die Korrelation zwischen den Empfangssignalen bei horizontaler und vertikaler Polarisation innerhalb einer Zeitreihe von Radarpulsen. Bei gleichmäßig fallenden Teilchen, wie z.B. Regentropfen ist diese Korrelation sehr hoch, nahe 1, bei unregelmäßig fallenden Teilchen, wie Hagel, Graupel oder schmelzende Schneeflocken reduziert sich ρ_{HV} bis auf Werte von 0,7 (Bild 6 rechts). ρ_{HV} wird zur Unterscheidung von Hydrometeoren verwendet.

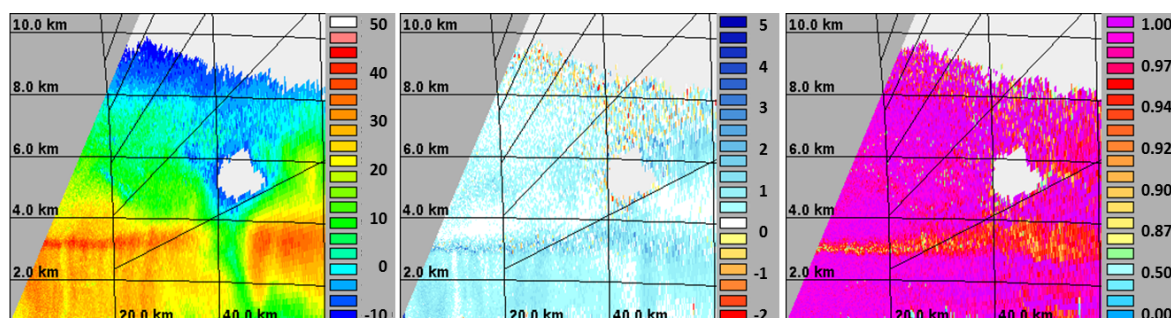


Bild 6: Vertikalschnitt durch ein Niederschlagsgebiet. Reflektivitätsfaktor Z in dBZ (links), differentielle Reflektivität Z_{DR} in dB (Mitte), kopolare Kreuzkorrelation ρ_{HV} (rechts). Messungen mit dem DLR Radar POLDIRAD am 6.8.2012 um 16:08 UTC.

3.3.3 Differentielle Ausbreitungsphase

Während die oben beschriebenen Zielgrößen von den Eigenschaften der rückstreuenden Teilchen abhängen, beschreibt die differentielle Ausbreitungsphase die Einflüsse der Niederschlagsteilchen auf die elektromagnetische Welle auf dem Weg zum streuenden Teilchen. Abgeflachte Regentropfen rufen eine unterschiedliche Verzögerung der horizontalen und vertikal polarisierten Welle hervor, da der Weg der Wellen durch das Medium Wasser eines oblaten Regentropfens mit einer im Vergleich zur umgebenden Luft niedrigeren Ausbreitungsgeschwindigkeit unterschiedlich lang ist. Dies führt zu einer Phasenverschiebung zwischen den beiden unterschiedlich polarisierten Wellen. Die differentielle Ausbreitungsphase ϕ_{DP} ist das Integral der Phasenverschiebung entlang des

Ausbreitungswegs zwischen Radar und rückstreuendem Teilchen und zurück zum Radar. ϕ_{DP} wird in Grad gemessen und nimmt entlang des Ausbreitungswegs stetig zu.

Die spezifische differentielle Ausbreitungsphase K_{DP} beschreibt die Steigung von ϕ_{DP} entlang eines Entfernungsabschnitts, die Einheit ist Grad pro km (Bild 7). K_{DP} ist in der Größenordnung von 0 - 8 $^{\circ}\text{km}^{-1}$ in Regen (im C-Band). K_{DP} wird zur Bestimmung der Regenintensität und zur Korrektur von Dämpfungseffekten verwendet.

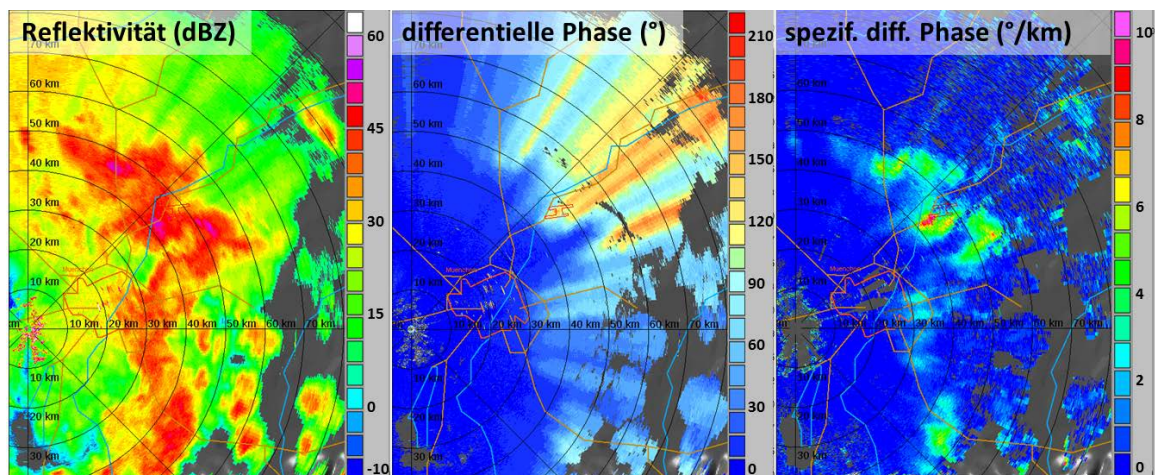


Bild 7: PPI Darstellung des Reflektivitätsfaktors Z in dBZ (links), der differentiellen Phase ϕ_{DP} in Grad (Mitte) und der spezifischen differentiellen Phase K_{DP} in Grad/km (rechts). Messungen mit dem DLR Radar POLDIRAD am 22.7.2010 um 19:13 UTC.

4. Abgeleitete Radarprodukte

Aus den oben beschriebenen Zielgrößen lässt sich eine Zahl von Produkte ableiten, die für die meteorologische und hydrologische Praxis von Bedeutung sind. Hier sollen kurz die Bestimmung der Regenintensität, die Ableitung von Windmessungen und die Klassifizierung von Hydrometeoren vorgestellt werden. Weitere Produkte und Details finden sich den anderen Beiträgen zu dieser Veranstaltung sowie in der entsprechenden Fachliteratur (zum Beispiel [1], [2], [3]).

4.1 Bestimmung der Regenintensität

Die klassische Anwendung eines Wetterradars ist die Regenintensität flächendeckend mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu bestimmen. Ein Wetterradar bietet hier Vorteile gegenüber einem Netz von Niederschlagsmessgeräten. Allerdings ist der direkte Vergleich schwierig. Neben Einschränkungen, die sich durch die Aufstellung des Radars (Abschattung des Radarstrahls, Störschos, Bodenreflektionen) oder durch die Messung (Ausbreitungsbedingungen, Dämpfung) ergeben, gibt es noch Unterschiede durch die verschiedenen Messvolumen und der Tatsache, dass die Radarmessungen in der Höhe stattfinden, während das Niederschlagsmessgerät am Boden steht.

Prinzipiell ist es nicht möglich, einen linearen Zusammenhang zwischen dem Radarreflektivitätsfaktor z und der Regenintensität R herzustellen. Beide sind

unterschiedliche Momente der Regentropfengrößenverteilung, die jedoch a priori nicht bekannt ist und von Niederschlagsereignis zu Niederschlagsereignis variieren kann. Aufgrund von Langzeitmessungen wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von empirischen Beziehungen in der Form $z = a \cdot R^b$ aufgestellt. Die Koeffizienten a und b variieren mit der Niederschlagsart (stratiform oder konvektiv) und mit den unterschiedlichen Klimazonen. Mit diesen z - R Beziehungen kann die Regenintensität aus Messungen des Reflektivitätsfaktors mit einer Unsicherheit von etwa 10-20% bestimmt werden.

Bei einem polarimetrischen Radar sind zusätzliche Zielgrößen wie Z_{DR} und K_{DP} verfügbar. Z_{DR} ist ein Maß für das Vorhandensein von großen Regentropfen und kann daher zusätzlich zu dem Reflektivitätsfaktor Informationen zu der Tropfengrößenverteilung geben. Auch hier werden wieder empirische Beziehungen zwischen R , z und Z_{DR} erstellt. Diese Beziehungen können erst ab einer gewissen Regenintensität (z.B. ab 2 mm/h) angewandt werden, da genügend größere abgeflachte Regentropfen vorhanden sein müssen, um Z_{DR} ausreichend genau bestimmen zu können. Mit K_{DP} kann ein nahezu linearer Zusammenhang zur Masse der Regentropfen erstellt werden. K_{DP} ist daher besonders geeignet, die Regenintensität zu bestimmen. Allerdings sind die differentiellen Ausbreitungsphasen auf kurzen Strecken und bei niedriger Regenintensität zu gering, um mit ausreichender Genauigkeit messbar zu sein. Daher werden empirische Beziehungen zwischen R und K_{DP} meist erst bei höheren Regenintensitäten (z.B. ab 10 mm/h) angewandt.

4.2 Ableitung des Windfelds

Wie oben erwähnt, beschreibt die Radial- oder Dopplergeschwindigkeit nur die radiale Komponente des drei-dimensionalen Bewegungsvektors. Für die meteorologische Interpretation sind jedoch alle drei Komponenten, oder zumindest die beiden horizontalen Komponenten von Interesse.

Verfahren, die das Windfeld oder Komponenten davon mit einem Radar bestimmen, werden als single-Doppler Verfahren bezeichnet. Hier werden Vereinfachungen des Windfelds angenommen, wie zum Beispiel, dass das Windfeld in einem gewissen Bereich konstant ist. Wird dieser Bereich von verschiedenen Blickwinkeln mit einem Radar erfasst, dann lassen sich Windkomponenten ableiten. Bei dem VAD [4] oder VVP [5] Verfahren werden zum Beispiel durch Messung der Dopplergeschwindigkeit in dem Volumen um das Radar der horizontale Windvektor als mittleres Profil über dem Radarstandort bestimmt. Ein anderes Verfahren – Uniform Wind Technique – erlaubt die Ableitung von flächendeckenden Windvektoren [6], auch hier ist die Voraussetzung, dass der Wind in einem gewissen Bereich, z.B. 20 x 20 km² konstant ist (vgl. auch Bild 5).

Betrachten mehrere Dopplerradare das gleiche Niederschlagsereignis aus verschiedenen Blickwinkeln, so lassen sich durch eine Kombination der verschiedenen Radialgeschwindigkeiten ebenfalls die drei Bewegungskomponenten ableiten. Diese

multiple-Doppler Verfahren wurden in der Vergangenheit bei Feldkampagnen angewandt wenn mehrere Dopplerradare in einem eng begrenzten Gebiet (ca. 100 x 100 km²) betrieben wurden. Aber auch mit dichten operationellen Radarnetzen sind solche Verfahren möglich ([7], [8]). Der Vorteil gegenüber den single-Doppler Verfahren ist die mit den multiple-Doppler Verfahren mögliche hohe räumliche Auflösung in der Größenordnung von 1 Kilometer. Diese Verfahren sind insbesondere auch für konvektive Ereignisse geeignet bei denen Annahmen für die die single-Doppler Verfahren durch die große räumliche Variabilität des Windfelds verletzt sind.

4.3 Klassifikation von Hydrometeoren

Die Zielgrößen, die mit einem dual-Polarisations Radar gemessen werden können, hängen von der Form und der Phase der streuenden Teilchen ab. Aber auch die Orientierung beim Fallen und das Fallverhalten haben einen Einfluss auf den Wertebereich, den die verschiedenen Zielgrößen einnehmen können. Aufgrund des erwarteten Wertebereichs verschiedener Hydrometeore, aber auch nicht-meteorologischer Echos (Bodenechos, clear-air Echos von Insekten und Vögel, militärische Störer) lassen sich Verfahren entwickeln, die eine automatische Klassifikation der Niederschlagsart erlauben. Dies geschieht entweder über einen Entscheidungsbaum ([9]) mit einer eingeschränkten Zahl von Zielgrößen als Eingangsparameter, oder bei moderneren Verfahren ([10]) mit Hilfe einer „Fuzzy-Logic“-Methode. Bild 8 zeigt ein Beispiel der Methode nach [9]. Wichtig bei diesen Verfahren ist, dass die Zielgrößen von Effekten wie Dämpfung oder Mehrfachstreuung durch eine umfassende automatische Qualitätskontrolle bereinigt worden sind. Auch kann die Hydrometeorklassifikation dazu dienen, die Qualität der abgeleiteten Regenintensität zu erhöhen, indem z.B. clear-air Echos vorher beseitigt werden.

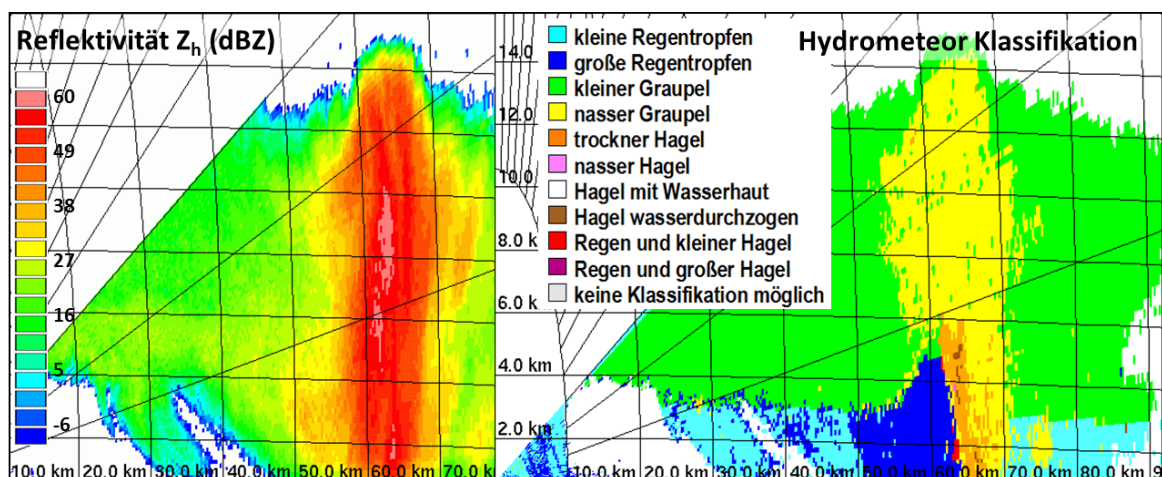


Bild 8: Vertikalschnitt durch ein Gewitter. Reflektivitätsfaktor Z in dBZ (links) und Hydrometeorklassifikation (rechts). Messungen mit dem DLR Radar POLDIRAD am 12.8.2004 um 16:58 UTC.

5. Schlussbetrachtung

Ein modernes dual-Polarisations Wetterradar liefert eine Reihe von Produkten die für die Meteorologie und Hydrologie von großer Hilfe bei der Analyse des Zustands von Niederschlagssystemen und deren Vorhersage nützlich sind. Wetterradare sind inzwischen ein unverzichtbarer Bestandteil der kurzfristigen und kürzestfristigen Wettersvorhersage. Durch leistungsfähige Signal-Prozessoren und fortschrittlichen Algorithmen können viele der in der Vergangenheit störenden Nachteile zum größten Teil vermieden werden. Durch die Synergie mit anderen Sensoren, wie zum Beispiel Niederschlagsmessgeräten, Blitzmesssystemen oder Satellitenbeobachtungen lassen sich die Analyse- und Vorhersageverfahren weiter verbessern. Die Zukunft des Wetterradars liegt somit mehr in der Entwicklung von neuen Algorithmen, insbesondere auch zur Qualitätskontrolle, als in der Entwicklung von neuen Technologien. Systeme, bei denen der Radarstrahl elektronisch statt mechanisch steuerbar ist sind in der Entwicklung, sie würden eine noch schnellere und adaptive Abtastung des Volumens ermöglichen, aber zum jetzigen Zeitpunkt ist die Qualität der Messgrößen noch nicht ausreichend hoch. Ein weiterer Trend für operationelle Anwendungen geht zu der Verdichtung der Radarmessnetze durch zusätzliche kostengünstige Wetterradarsysteme (meistens im X-Band), um die Messungen in Bodennähe durchzuführen und Dämpfungseffekte besser korrigieren zu können.

Literatur

- [1] Sauvageot, H. (1992): *Radar Meteorology*. Artech House, Boston, 384 pp.
- [2] Meischner, P. (ed.) (2004): *Weather radar: Principles and advanced applications*. Springer, Berlin, 337 pp.
- [3] Bringi, V. N. and Chandrasekar, V. (2001): *Polarimetric Doppler Weather Radar – Principles and Applications*. Cambridge University Press, 636 pp.
- [4] Browning, K.A. and R. Wexler (1968): The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, **7**, 105-113.
- [5] Waldteufel, P. and H. Corbin (1979): On the analysis of single-Doppler radar data. *J. Appl. Meteor.*, **18**, 532-542.
- [6] Hagen, M. (1992): On the appearance of a cold front with a narrow rainband in the vicinity of the Alps. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **48**, 231-248.
- [7] Friedrich, K. and M. Hagen, 2004: On the use of advanced Doppler radar techniques to determine horizontal wind fields for operational weather surveillance. *Meteorol. Appl.*, **11**, 155-171.
- [8] Bousquet, O., P. Tabary, J. Parent du Châtelet, 2008: Operational Multiple-Doppler Wind Retrieval Inferred from Long-Range Radial Velocity Measurements. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 2929–2945.

- [9] Höller, H., Bringi, V.N., Hubbert, J., Hagen, M. und P.F. Meischner (1994): Life Cycle and precipitation formation in a hybrid-type hailstorm revealed by polarimetric and Doppler radar-measurements. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 2500-2522.
- [10] Vivekanandan, J., Ellis, S. M., Oye, R., Zrnic, D. S., Ryzhkov, A. V., Straka, J. (1999): Cloud microphysics retrieval using S-band dual-polarization radar measurements, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 381-388